

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2004-328814

(43)Date of publication of application : 18.11.2004

(51)Int.Cl.

H02P 6/10

B62D 5/04

H02P 21/00

(21)Application number : 2003-115926

(71)Applicant : KOYO SEIKO CO LTD

(22)Date of filing : 21.04.2003

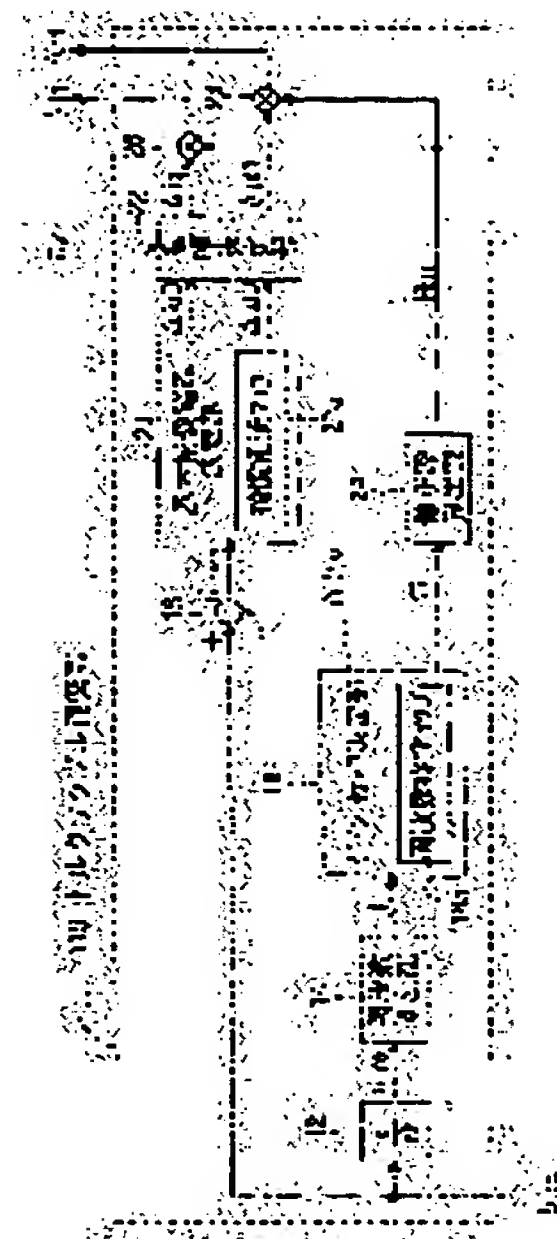
(72)Inventor : NISHIZAKI KATSUTOSHI
UEDA TAKESHI

(54) ELECTRIC POWER STEERING DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an electric power steering device capable of fully reducing electric ripple regardless of driving state.

SOLUTION: The instruction value of a compensation current for suppressing electric ripple caused by distortion of the induced electromotive force waveform of a motor is determined as follows based on a compensation current map 20a for representing relation between the electric angle and the compensation current per a unit torque and a frequency characteristics map 16a for representing the frequency characteristics of a current control system of the motor. Firstly, current compensation values Δi_{q0} and Δi_{d0} per a unit torque are determined based on a motor electric angle θ_{mre} which is corrected to compensate phase delay in the current control system. In order that the amplitude of the compensation current is proportional to a motor load, the compensation values are multiplied with a factor corresponding to q-axis basic current instruction value i^*_{q0} , to calculate current compensation values Δi_{q1} and Δi_{d1} . Then, in order to compensate gain drop in the current control system, the compensation values are multiplied with a correction rate R_m to calculate q-axis and d-axis current compensation values Δi_q and Δi_d as compensation current instruction values.



Best Available Copy

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

車両操舵のための操作に応じて決定される電流目標値に基づいて電動モータを駆動することにより当該車両のステアリング機構に操舵補助力を与える電動パワーステアリング装置であって、

前記電動モータの回転速度を検出する回転速度検出手段と、

前記電動モータにおける誘導起電力波形の歪みに起因するトルクリップルの発生を抑えるために前記電動モータに流すべき補償電流の指令値を、前記電動モータの負荷に相当する物理量である負荷相当量および前記回転速度検出手段によって検出される回転速度に応じて決定する補償電流決定手段と、

前記補償電流決定手段によって決定された補償電流指令値に基づき前記電流目標値を補正する補正手段と、

前記補正手段によって補正された後の前記電流目標値の電流が前記電動モータに流れるように前記電動モータに対してフィードバック制御を行い、当該フィードバック制御による前記電動モータの電流制御系を構成する制御手段と

を備えることを特徴とする電動パワーステアリング装置。

【請求項 2】

前記補償電流決定手段は、

前記電動モータに流すべき補償電流の振幅が前記負荷相当量に比例するように前記補償電流指令値の振幅を決定する振幅決定手段と、

前記電流制御系の周波数特性によるゲイン低下が補われるように、前記決定された振幅を前記回転速度に応じて修正する振幅修正手段と

を含むことを特徴とする、請求項 1 に記載の電動パワーステアリング装置。

【請求項 3】

前記補償電流決定手段は、前記電流制御系の周波数特性による位相遅れが補われるように、前記回転速度に応じて前記補償電流指令値の位相を修正する位相修正手段を更に含むことを特徴とする、請求項 2 に記載の電動パワーステアリング装置。

【請求項 4】

前記補償電流決定手段は、

前記電動モータに流すべき補償電流の振幅が前記負荷相当量に比例するように前記補償電流指令値の振幅を決定する振幅決定手段と、

前記電流制御系の周波数特性による位相遅れが補われるように、前記回転速度に応じて前記補償電流指令値の位相を修正する位相修正手段と

を含むことを特徴とする、請求項 1 に記載の電動パワーステアリング装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、電動モータによって車両のステアリング機構に操舵補助力を与える電動パワーステアリング装置に関し、更に詳しくは、電動パワーステアリング装置における電動モータのトルクリップルの低減に関する。

【0002】

【従来の技術】

従来から、運転者がハンドル（ステアリングホイール）に加える操舵トルクに応じて電動モータを駆動することによりステアリング機構に操舵補助力を与える電動パワーステアリング装置が用いられている。

【0003】

ところで電動モータでは出力トルクに必ずリップル（脈動）が生じる。このトルクリップルは、モータにおける極対数やスロット数等の構造上の要因によって生じるもの（「機械的リップル」または「コギングトルク」と呼ばれる）と、モータにおける誘導起電力波形が理想波形（ブラシ付きモータの場合には直流波形。3相正弦波駆動ブラシレスモータの

10

20

30

40

50

場合には各相正弦波。)からずれていることに起因して生じるもの(以下「電気リップル」という)とに大別される。電動パワーステアリング装置では、これらのトルクリップルによる操舵フィーリングの悪化がしばしば指摘され、これに対しモータのメーカーは、これらのトルクリップルを極力小さくするための努力を払っている。しかし、これらのうち電気リップルは、モータの負荷(モータ電流または出力トルク)に比例した大きさのリップルとして現れるため、モータの出力トルクの滑らかさが重要視される電動パワーステアリング装置では特に問題となる。

【0004】

これに対し、モータの駆動方法を工夫することによりトルクリップルを低減する手法が従来より提案されている。例えば、3相正弦波駆動ブラシレスモータのトルクリップルを低減するために、無負荷誘導起電力の実測データ(このデータの示す波形は正弦波に対して歪んでいる)に基づき、誘導起電力波形の歪みに起因する電気リップルを相殺するための最適なd軸およびq軸電流波形(周期的変動を有する波形)を求めるという手法が提案されている(非特許文献1参照)。この手法によれば、求められたd軸およびq軸電流波形の電流である補償電流の振幅を負荷に比例して大きくすることにより、一定速度での回転状態の場合には、負荷が変動してもトルクリップルをほぼ解消することが可能となる。

【0005】

【特許文献1】

特開平11-191992号公報

【非特許文献1】

陳善忠、関口隆、「誘導起電力ベクトルに追従する電流による永久磁石同期電動機の高効率低トルク脈動制御」、電気学会論文誌D、電気学会、平成12年、第120巻、第4号、p. 559-p. 565

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

しかし、電動パワーステアリング装置で使用されるモータにおいては、負荷変動に加えて、運転状況に応じて回転速度も刻々変化する。そのため、電動パワーステアリング装置において上記のような手法をそのまま適用しても、電気リップルを十分に低減することはできない。

【0007】

そこで本発明では、運転状況に拘わらず電気リップルを十分に低減することができる電動パワーステアリング装置を提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段および発明の効果】

第1の発明は、車両操舵のための操作に応じて決定される電流目標値に基づいて電動モータを駆動することにより当該車両のステアリング機構に操舵補助力を与える電動パワーステアリング装置であって、

前記電動モータの回転速度を検出する回転速度検出手段と、

前記電動モータにおける誘導起電力波形の歪みに起因するトルクリップルの発生を抑えるために前記電動モータに流すべき補償電流の指令値を、前記電動モータの負荷に相当する物理量である負荷相当量および前記回転速度検出手段によって検出される回転速度に応じて決定する補償電流決定手段と、

前記補償電流決定手段によって決定された補償電流指令値に基づき前記電流目標値を補正する補正手段と、

前記補正手段によって補正された後の前記電流目標値の電流が前記電動モータに流れるように前記電動モータに対してフィードバック制御を行い、当該フィードバック制御による前記電動モータの電流制御系を構成する制御手段と

を備えることを特徴とする。

【0009】

このような第1の発明によれば、トルクリップル(電気リップル)の発生を抑制するため

10

20

30

40

50

の補償電流がモータ負荷に応じて変化するだけでなく、モータの回転速度に応じても変化するので、モータ負荷の変動に加え、運転状況に応じてモータの回転速度が刻々変化しても、適切な補償電流をモータに与えることができ、電気リップルの発生を十分に低減することができる。

【0010】

第2の発明は、第1の発明において、

前記補償電流決定手段は、

前記電動モータに流すべき補償電流の振幅が前記負荷相当量に比例するように前記補償電流指令値の振幅を決定する振幅決定手段と、

前記電流制御系の周波数特性によるゲイン低下が補われるように、前記決定された振幅を前記回転速度に応じて修正する振幅修正手段とを含むことを特徴とする。 10

【0011】

このような第2の発明によれば、トルクリップル（電気リップル）の発生を抑制するための補償電流の振幅がモータ負荷に比例して変化するだけでなく、電流制御系における周波数特性によるゲイン低下が補われるように補償電流指令値の振幅が修正されるので、モータ負荷の変動に加え、運転状況に応じてモータの回転速度が刻々変化しても、適切な振幅の補償電流がモータに与えられる。これにより、電気リップルの発生を十分に抑制することができる。

【0012】

第3の発明は、第2の発明において、 20

前記補償電流決定手段は、前記電流制御系の周波数特性による位相遅れが補われるように、前記回転速度に応じて前記補償電流指令値の位相を修正する位相修正手段を更に含むことを特徴とする。

【0013】

このような第3の発明によれば、電流制御系の周波数特性による位相遅れが補われるように補償電流指令値の位相が修正されるので、運転状況に応じてモータの回転速度が刻々変化しても、適切な位相の補償電流がモータに与えられる。これにより、電気リップルの発生をより十分に抑制することができる。また、上記の位相修正によってモータにおける実際の補償電流と誘起電圧との間の位相ずれが解消されるので、モータ負荷に応じて補償電流の振幅が大きくなっても、電気リップルの位相は変化しない。このため、モータ負荷に応じた位相調整は不要である。 30

【0014】

第4の発明は、第1の発明において、

前記補償電流決定手段は、

前記電動モータに流すべき補償電流の振幅が前記負荷相当量に比例するように前記補償電流指令値の振幅を決定する振幅決定手段と、

前記電流制御系の周波数特性による位相遅れが補われるように、前記回転速度に応じて前記補償電流指令値の位相を修正する位相修正手段と

を含むことを特徴とする。

【0015】

40

このような第4の発明によれば、トルクリップル（電気リップル）の発生を抑制するための補償電流の振幅がモータ負荷に比例して変化するだけでなく、電流制御系における周波数特性による位相遅れが補われるように補償電流指令値の位相が修正されるので、運転状況に応じてモータの回転速度が刻々変化しても、適切な位相の補償電流がモータに与えられる。これにより、電気リップルの発生を十分に抑制することができる。また、上記の位相修正によってモータにおける実際の補償電流と誘起電圧との間の位相ずれが解消されるので、モータ負荷に応じた位相調整は不要である。

【0016】

【発明の実施の形態】

以下、添付図面を参照して本発明の実施形態について説明する。

50

< 1 全体構成 >

図1は、本発明の一実施形態に係る電動パワーステアリング装置の構成を、それに関連する車両構成と共に示す概略図である。この電動パワーステアリング装置は、操舵のための操作手段としてのハンドル（ステアリングホイール）100に一端が固着されるステアリングシャフト102と、そのステアリングシャフト102の他端に連結されたラックピニオン機構104と、ハンドル100の操作によってステアリングシャフト102に加えられる操舵トルクを検出するトルクセンサ3と、ハンドル操作（操舵操作）における運転者の負荷を軽減するための操舵補助力を発生させるブラシレスモータ6と、その操舵補助力をラック軸に伝達するボールねじ駆動部61と、ブラシレスモータ6のロータの回転位置を検出するレゾルバ等の位置検出センサ62と、車載バッテリー8からイグニションスイッチ9を介して電源の供給を受け、トルクセンサ3や車速センサ4、位置検出センサ62からのセンサ信号に基づきモータ6の駆動を制御する電子制御ユニット（ECU）5とを備えている。このような電動パワーステアリング装置を搭載した車両において運転者がハンドル100を操作すると、トルクセンサ3は、その操作による操舵トルクを検出し、操舵トルクを示す操舵トルク信号Tsを出力する。一方、車速センサ4は、車両の速度（車速）を検出し、車速を示す車速信号Vsを出力する。制御装置としてのECU5は、それら操舵トルク信号Tsおよび車速信号Vsと、位置検出センサ62によって検出されるロータの回転位置とに基づいて、モータ6を駆動する。これによりモータ6は操舵補助力を発生し、この操舵補助力がボールねじ駆動部61を介してラック軸に加えられることにより、操舵操作における運転者の負荷が軽減される。すなわち、ハンドル操作によって加えられる操舵トルクによる操舵力とモータ6の発生する操舵補助力との和によって、ラック軸が往復運動を行う。ラック軸の両端はタイロッドおよびナックルアームから成る連結部材106を介して車輪108に連結されており、ラック軸の往復運動に応じて車輪108の向きが変わる。

【0017】

< 2 モータ制御の概要 >

本実施形態におけるモータ6は、永久磁石からなる界磁としてのロータ（以下「回転界磁」ともいう）と、U相、V相およびW相の3相コイルからなるステータとから構成される正弦波駆動のブラシレスモータである。

【0018】

このモータ6に適切な操舵補助力を発生させるためにU相、V相およびW相のコイルに流すべき電流の目標値すなわち各相の電流指令値は、次式で表される。

$$i^*_u = I^* \sin \theta_{re} \quad \dots (1a)$$

$$i^*_v = I^* \sin(\theta_{re} - 2\pi/3) \quad \dots (1b)$$

$$i^*_w = I^* \sin(\theta_{re} - 4\pi/3) = -i^*_u - i^*_v \quad \dots (1c)$$

ここで、 i^*_u はu相電流指令値、 i^*_v はv相電流指令値、 i^*_w はw相電流指令値であり、 θ_{re} は、図2に示すようにu相コイルを基準として時計回りにとった回転界磁の角度（「電気角」と呼ばれる）である。ただし、ロータの機械角を θ_m 、極数を $2p$ としたとき、電気角は $\theta_{re} = p \cdot \theta_m$ となる。

【0019】

通常、ブラシレスモータに印加すべき電圧の指令値は、電流目標値とモータ電流の検出値との偏差に基づく制御演算によって算出されるが、位相遅れを低減するために、この制御演算ではd-q座標で電流指令値が表現され、d軸およびq軸電流指令値に基づき電圧指令値が算出される。ここで、d-q座標は、永久磁石からなる回転界磁（ロータ）と同期して回転する回転座標系であって、回転界磁の磁束方向をd軸とし、d軸と直交する方向をq軸とする。上記各相の電流指令値 i^*_u 、 i^*_v 、 i^*_w は交流であるが、このd-q座標によれば電流指令値が直流となる。

【0020】

上記式 (1 a) ~ (1 c) で表現される各相の電流指令値を d - q 座標で表すと次のようになる。

$$i_d^* = 0 \quad \dots (2 a)$$

$$i_q^* = -\sqrt{3/2} I^* \quad \dots (2 b)$$

ここで、 i_d^* は d 軸電流指令値、 i_q^* は q 軸電流指令値である。

【0021】

一方、モータ電流については、電流検出器で u 相電流および v 相電流が検出されると、その検出結果から d 軸電流検出値 i_d および q 軸電流検出値 i_q が次式により算出される。

$$i_d = \sqrt{2} \{ i_v \sin \theta_{re} - i_u \sin(\theta_{re} - 2\pi/3) \} \quad \dots (3 a)$$

$$i_q = \sqrt{2} \{ i_v \cos \theta_{re} - i_u \cos(\theta_{re} - 2\pi/3) \} \quad \dots (3 b)$$

ここで、 i_u は u 相電流検出値、 i_v は v 相電流検出値であり、 θ_{re} は上記電気角である。

【0022】

本実施形態では、上記の d 軸電流における指令値 i_d^* と検出値 i_d との偏差 $e_d = i_d^* - i_d$ 、および、上記の q 軸電流における指令値 i_q^* と検出値 i_q との偏差 $e_q = i_q^* - i_q$ が打ち消されるように、後述の電流制御部 200 によってモータ 6 に対するフィードバック制御が行われる。

【0023】

< 3 制御装置の構成 >

本実施形態では、電動パワーステアリング装置における制御装置である ECU 5 において、モータ 6 に対する上記のようなフィードバック制御が行われる。図 3 は、この ECU 5 の構成を示すブロック図である。この ECU 5 は、位相補償器 112 と、マイクロコンピュータ（以下「マイコン」と略記する）10 と、モータ駆動部とから構成される。マイコン 10 は、その内部のメモリに格納された所定のプログラムを実行することにより、目標電流演算部 114 と、指令電流方向指定部 116 と、収斂性補正部 117 と、トルクリップル補償部 118 と、加算器 120、121、122 と、減算器 123、124 と、d 軸電流 PI 制御部 126 と、q 軸電流 PI 制御部 128 と、d - q / 3 相交流座標変換部 132 と、符号反転加算器 134 と、3 相交流 / d - q 座標変換部 138 と、正弦波 ROM テーブル 140 と、ロータ角速度演算部 142 とからなるモータ制御部として機能する。モータ駆動部は、モータ制御部としてのマイコン 10 から出力される電圧指令値に基づき、u 相、v 相および w 相からなる 3 相のブラシレスモータ 6 を駆動するハードウェア（回路）であって、3 相 PWM 変調部 150 と、モータ駆動回路 152 と、u 相電流検出器 156 と、v 相電流検出器 154 と、ロータ角度位置検出器 162 とから構成される。

【0024】

本実施形態では、ハンドル 100 の操作によってステアリングシャフト 102 に加えられる操舵トルクがトルクセンサ 3 によって検出され、トルクセンサ 3 から出力される操舵トルク信号 T_s が上記構成の ECU 5 に入力されると共に、車速が車速センサ 4 によって検出され、車速センサ 4 から出力される車速信号 V_s も ECU 5 に入力される。ECU 5 では、入力された操舵トルク信号 T_s に対して位相補償器 112 により位相補償が施され、その位相補償後の信号は、目標電流演算部 114 に入力される。一方、車速センサ 4 から出力される車速信号 V_s は、ECU 5 における目標電流演算部 114 と収斂性補正部 117 とに入力される。また、モータ 6 に取り付けられた位置検出センサ 62 から出力されるセンサ信号 S_r が、ECU 5 におけるロータ角度位置検出器 162 に入力され、ロータ角度位置検出器 162 は、モータ 6 のロータである回転界磁（永久磁石）の回転位置すなわち電気角 θ_{re} を示す信号を出力する。この電気角 θ_{re} を示す信号は、正弦波 ROM テーブル 140 とロータ角速度演算部 142 とに入力される。

【0025】

目標電流演算部 114 は、上記操舵トルク信号 T_s と上記車速信号 V_s とに基づき、モータ

20

30

40

50

タ6に供給すべき電流の値である電流目標値 I_t を算出する。具体的には、適切な操舵補助力を発生させるためにモータ6に供給すべき電流の目標値と操舵トルクとの関係を車速をパラメータとして示すテーブル（「アシストマップ」と呼ばれる）が目標電流演算部114内に予め保持されており、目標電流演算部114は、このアシストマップを参照して電流目標値 I_t を設定する。この電流目標値 I_t は、既述の式（2b）で表されるq軸電流に相当する電流指令値を示す符号付きの値であって、その正負は、操舵補助の方向、すなわち右方向操舵を補助する方向のトルクをモータ6に発生させるべきか、左方向操舵を補助する方向のトルクをモータ6に発生させるべきかを示している。

【0026】

指令電流方向指定部116は、上記電流目標値 I_t の正負を示す信号すなわち操舵補助の方向を示す信号（以下「方向信号」という） S_{dir} を生成し、この方向信号 S_{dir} は収斂性補正部117に入力される。また、ロータ角速度演算部142は、ロータ角度に相当する電気角 θ_{re} を示す信号に基づきロータ角速度 ω_{re} を算出し、このロータ角速度 ω_{re} を示す信号も収斂性補正部117に入力される。収斂性補正部117は、これらの信号と車速信号 V_s とに基づき、車両収斂性を確保するための補償電流値 i_c を算出する。加算器120は、この補償電流値 i_c を上記の電流目標値 I_t に加算し、その結果得られる加算値をq軸基本電流指令値 i^*_{q0} として出力する。このq軸基本電流指令値 i^*_{q0} は、操舵補助のためにモータ6が発生すべきトルクに対応する電流の指令値であり、加算器122に入力される。一方、d軸電流はトルクに関与しないので、d軸電流指令値の基本となるd軸基本電流指令値 i^*_{d0} は、 $i^*_{d0} = 0$ として加算器121に入力される。

【0027】

トルクリップル補償部118は、モータ6における誘導起電力波形の歪みに起因するトルクリップル（以下「電気リップル」という）の発生を抑制するためにモータ6に流すべき補償電流の指令値を決定する補償電流決定手段として機能するものであって、電気角 θ_{re} およびq軸基本電流指令値 i^*_{q0} に基づき、d軸電流補償値 Δi_d およびq軸電流補償値 Δi_q を上記補償電流の指令値として求める（詳細は後述）。これらの電流補償値 Δi_d 、 Δi_q は、加算器121、122にそれぞれ入力される。加算器121は、入力されるd軸電流補償値 Δi_d を上記のd軸基本電流指令値 i^*_{d0} に加算することによりd軸電流指令値 i^*_d を求め、加算器122は、入力されるq軸電流補償値 Δi_q を上記のq軸基本電流指令値 i^*_{q0} に加算することによりq軸電流指令値 i^*_q を求める。すなわち、

$$i^*_d = i^*_{d0} + \Delta i_d \quad \dots (4a)$$

$$i^*_q = i^*_{q0} + \Delta i_q \quad \dots (4b)$$

である。これらの式（4a）（4b）は、適切な操舵補助力を得るためにモータ6に流すべき電流の目標値が、電気リップルの抑制のためにd軸電流補償値 Δi_d およびq軸電流補償値 Δi_q に基づき補正されることを示している。

【0028】

u相電流検出器156とv相電流検出器154は、モータ駆動回路152からモータ6に供給される電流のうちu相電流とv相電流をそれぞれ検出し、u相電流検出値 i_u とv相電流検出値 i_v をそれぞれ出力する。正弦波ROMテーブル140は、角度 θ の各種の値と $\sin \theta$ の各種の値とを互いに対応付けて格納しており、ロータ角度位置検出器162からの信号の示す電気角 θ_{re} に対応する正弦波値 $\sin \theta_{re}$ を出力する。3相交流／d-q座標変換部138は、この正弦波値 $\sin \theta_{re}$ を用いて、式（3a）（3b）すなわち次式により、上記のu相電流検出値 i_u およびv相電流検出値 i_v を、d-q座標上の値すなわちd軸電流検出値 i_d およびq軸電流検出値 i_q に変換する。

$$i_d = \sqrt{2} \{ i_v \sin \theta_{re} - i_u \sin(\theta_{re} - 2\pi/3) \}$$

$$i_q = \sqrt{2} \{ i_v \cos \theta_{re} - i_u \cos(\theta_{re} - 2\pi/3) \}$$

このようにして得られたd軸電流検出値 i_d およびq軸電流検出値 i_q は、減算器123および減算器124にそれぞれ入力される。

【0029】

減算器123は、加算器121からのd軸電流指令値 i^*_d と3相交流／d-q座標変換部138からのd軸電流検出値 i_d との偏差であるd軸電流偏差 $e_d = i^*_d - i_d$ を算出し、d軸電流PI制御部126は、このd軸電流偏差 e_d に対する比例積分制御演算によってd軸電圧指令値 v^*_d を求める。一方、減算器124は、加算器122からのq軸電流指令値 i^*_q と3相交流／d-q座標変換部138からのq軸電流検出値 i_q との偏差であるq軸電流偏差 $e_q = i^*_q - i_q$ を算出し、q軸電流PI制御部128は、このq軸電流偏差 e_q に対する比例積分制御演算によってq軸電圧指令値 v^*_q を求める。すなわち、次式によりd軸電圧指令値 v^*_d およびq軸電圧指令値 v^*_q を算出する。 10

$$v^*_d = K_p \{ e_d + (1/T_i) \int e_d dt \} \quad \dots (5a)$$

$$v^*_q = K_p \{ e_q + (1/T_i) \int e_q dt \} \quad \dots (5b)$$

ここで、 K_p は比例ゲインであり、 T_i は積分時間である。

【0030】

d-q／3相交流座標変換部132は、上記のd軸電圧指令値 v^*_d およびq軸電圧指令値 v^*_q を3相交流座標上の値であるu相電圧指令値 v^*_u およびv相電圧指令値 v^*_v に変換する。そして、符号反転加算器134は、それらの相電圧指令値 v^*_u および v^*_v からw相電圧指令値 v^*_w を算出する。すなわち、各相の電圧指令値 v^*_u 、 v^*_v 、 v^*_w が次式により算出される。 20

$$v^*_u = \sqrt{2/3} \{ v^*_d \cos \theta_{re} - v^*_q \sin \theta_{re} \} \quad \dots (6a)$$

$$v^*_v = \sqrt{2/3} \{ v^*_d \cos(\theta_{re} - 2\pi/3) - v^*_q \sin(\theta_{re} - 2\pi/3) \} \quad \dots (6b)$$

$$v^*_w = -v^*_u - v^*_v \quad \dots (6c)$$

【0031】

3相PWM変調部150は、上記のようにして算出された各相電圧指令値 v^*_u 、 v^*_v 、 v^*_w にそれぞれ応じたデューティ比のPWM信号 S_u 、 S_v 、 S_w を生成する。

【0032】

モータ駆動回路152は、例えば電力用MOSトランジスタ等のスイッチング素子を用いて構成されるPWM電圧形インバータであって、各スイッチング素子を上記PWM信号 S_u 、 S_v 、 S_w によってオン／オフさせることにより、ブラシレスモータ6に印加すべき各相電圧 v_u 、 v_v 、 v_w を生成する。これらの各相電圧 v_u 、 v_v 、 v_w は、ECU5から出力されてモータ6に印加される。この電圧印加に応じてモータ6の各相u、v、wのコイル（不図示）に電流が流れ、モータ6はその電流に応じて操舵補助のためのトルク T_m を発生させる。 30

【0033】

モータ6に流れる電流のうちu相電流 i_u とv相電流 i_v は、既述のようにu相電流検出器156とv相電流検出器154によってそれぞれ検出され、3相交流／d-q座標変換部138によってd-q座標上の電流値 i_d 、 i_q に変換される。これらd-q座標上の電流値 i_d 、 i_q のうちd軸電流検出値 i_d は減算器123に、q軸電流検出値 i_q は減算器124に、それぞれ入力される。これにより、所望の操舵補助力をモータ6によって発生させるべく、d軸電流検出値 i_d がd軸電流指令値 i^*_d に、q軸電流検出値 i_q がq軸電流指令値 i^*_q にそれぞれ等しくなるように、フィードバック制御が行われる（この制御は「電流制御」と呼ばれる）。 40

【0034】

<4 電流制御系>

上記のように本実施形態では、操舵トルクや車速に応じて適切な操舵補助が行われるようにモータ電流の目標値が設定され、その目標値が電気リップルの補償等のために補正され 50

、この補正後の目標値（ d 軸電流指令値 i^*_{d} および q 軸電流指令値 i^*_{q} ）の電流がモータ6に流れるようにフィードバック制御が行われる。ECU5のうちこのような電流制御を行う部分（以下「電流制御部」という）200は、図3において点線で囲まれた部分に相当する。本実施形態では、モータ6の制御手段であるこの電流制御部200のうち、モータ駆動部に相当する部分はハードウェア的に実現されており、モータ駆動部に相当する部分以外は、既述のように、マイコン10が所定のプログラムを実行することによりソフトウェア的に実現されている。そして、この電流制御部200とモータ6および位置検出センサ62とにより、フィードバックループを有する電流制御系が構成される。

【0035】

図7は、この電流制御系の周波数特性を示すボード線図である。 d 軸電流指令値 i^*_{d} を入力とし d 軸電流検出値 i_{d} を出力とする場合と q 軸電流指令値 i^*_{q} を入力とし q 軸電流検出値 i_{q} を出力とする場合のいずれの場合も、この電流制御系の閉ループ伝達関数に対するボード線図は、図7に示すようになる。図7に示されているように、この電流制御系は、実用的な周波数範囲においては、周波数が増大するにしたがって、ゲインが1（デシベル値では0）から低下し位相遅れが大きくなるという周波数特性を有している。

【0036】

<5 トルクリップル補償部の構成および動作>

既述のように、電気リップルの発生を抑制するためにモータ6に流すべき補償電流の指令値、すなわち d 軸電流補償値 Δi_{d} および q 軸電流補償値 Δi_{q} は、トルクリップル補償部118によって決定される。本実施形態では、このトルクリップル補償部118も、マイコン10が所定のプログラムを実行することによりソフトウェア的に実現されている。図4は、このトルクリップル補償部118の機能的構成を示すブロック図である。このトルクリップル補償部118は、微分器12と、周波数算出部14と、ゲイン・位相決定部16と、減算器18と、基本補償電流決定部20と、振幅決定部22と、修正率算出部24と、2個の乗算器26、28とを備えており、微分器12および減算器18には、電気角 θ_{re} を示す信号が入力され、振幅決定部22には、 q 軸基本電流指令値 i^*_{q0} が入力される。

【0037】

微分器12は、電気角 θ_{re} を示す信号を微分することにより、ロータ角速度 ω_{re} すなわちモータ6の回転角速度に相当する値（電気角換算の回転角速度）を算出する。周波数算出部14は、このロータ角速度 ω_{re} からモータ6の電気リップルの周波数 f を算出する（この f は補償電流の周波数に相当する）。すなわち、次式により周波数 f を算出する。

$$f = S \cdot \omega_{\text{re}} / (2\pi) \quad \dots (7)$$

ここで、 S はモータ6のスロット数である。

【0038】

ゲイン・位相決定部16は、図7に示したボード線図に相当する周波数特性マップすなわち電流制御系の周波数特性を示す周波数特性マップ16aを保持しており（具体的には、周波数特性マップ16aに相当するデータがマイコン10内のメモリに予め格納されている）、この周波数特性マップ16aを参照することにより、上記周波数 f に対応する電流制御系のゲイン G および位相差 $\Delta \theta_e$ を求める。上述のように、電流制御系では、周波数が増大するにしたがって、ゲインが1から低下し位相遅れが大きくなるので、ゲイン・位相決定部16により求まるゲイン G は1以下であり（デシベルで表すと負値）、位相差 $\Delta \theta_e$ は負値である。このようなゲイン G および位相差 $\Delta \theta_e$ は、修正率算出部24および減算器18にそれぞれ入力される。

【0039】

減算器18は、電気角 θ_{re} から上記の位相差 $\Delta \theta_e$ を減算し、その減算結果 $\theta_{\text{re}} - \Delta \theta_e$ を修正電気角 θ_{mre} として出力する。この減算により、電流制御系の周波数特性による位相遅れが補償されることになる。このようにして電流制御系における位相遅れが補

償された修正電気角 θ_{mre} は、基本補償電流決定部 20 に入力される。

【0040】

基本補償電流決定部 20 は、電気角と d 軸および q 軸電流補償値との関係を示すテーブルを補償電流マップ 20a として保持しており（具体的には、補償電流マップ 20a に相当するデータがマイコン 10 内のメモリに予め格納されている）、この補償電流マップ 20a を参照することにより、上記修正電気角 θ_{mre} に対応する d 軸電流単位補償値 Δi_{d0} および q 軸電流単位補償値 Δi_{q0} を求める。以下、この補償電流マップ 20a の作成方法について説明する。

【0041】

モータ 6 の無負荷誘導起電力波形が歪んでいる場合に各相の電流 i_u, i_v, i_w として 10
正弦波電流を流すと、トルクリプル（電気リップル）が発生する。しかし、非特許文献 1 にも記載されているように、無負荷誘導起電力の各時点における各相の瞬時値 e_{0u}, e_{0v}, e_{0w} が既知であれば、モータ 6 の出力トルクを一定値（例えば 1 [Nm]）とし電気リップルを生じさせないような各相の電流 i_u, i_v, i_w を求めることができる。例えば、出力トルクを一定値 T とし電気リップルを生じさせない各相電流値 i_u, i_v, i_w を次式により求めることができる。

$$i_u = \{(e_{0u} - e_{0v}) + (e_{0u} - e_{0w})\} T / \{(e_{0u} - e_{0v})^2 + (e_{0u} - e_{0w})^2 + (e_{0w} - e_{0v})^2\} \quad \dots (8a)$$

$$i_v = \{T - (e_{0u} - e_{0w}) i_u\} / (e_{0v} - e_{0w}) \quad \dots (8b)$$

$$i_w = \{T - (e_{0u} - e_{0v}) i_u\} / (e_{0w} - e_{0v}) \quad \dots (8c)$$

上記式により求められた各相電流値 i_u, i_v, i_w を次式により d-q 座標上の値に変換することで、電気リップルを生じさせずに出力トルクを一定値 T とするような d 軸電流値 i_d および q 軸電流値 i_q を得ることができる。

$$i_d = \sqrt{2} \{i_v \sin \theta - i_u \sin(\theta - 2\pi/3)\} \quad \dots (9a)$$

$$i_q = \sqrt{2} \{i_v \cos \theta - i_u \cos(\theta - 2\pi/3)\} \quad \dots (9b)$$

ただし、 θ は電気角である。

【0042】

そこで本実施形態では、以下のようにして補償電流マップ 20a を作成する。まず、図 5 に示すように、モータ 6 の各相の無負荷誘導起電力（誘起電圧）の瞬時値 e_{0u}, e_{0v}, e_{0w} の実測データを電気角の各種の値について求めておく。そして、この実測データを用いて、モータ 6 が電気リップルを生じさせることなく単位トルク（1 [Nm]）を出力するのに必要な d 軸電流値 i_{d01} および q 軸電流値 i_{q01} を算出すると共に（式（8a）～（9b）参照）、無負荷誘導起電力波形が歪んでいない場合にモータ 6 が単位トルクを出力するのに必要な d 軸電流値 i_{d02} および q 軸電流値 i_{q02} を求める（この場合、出力トルクは q 軸電流に比例し、d 軸電流は 0 とすればよいので、q 軸および d 軸電流 i_{q02}, i_{d02} は容易に求めることができる）。そして、両者の差である $\Delta i_{d0} = i_{d01} - i_{d02}$ および $\Delta i_{q0} = i_{q01} - i_{q02}$ をそれぞれ d 軸電流単位補償値 Δi_{d0} および q 軸電流単位補償値 Δi_{q0} とし、これらの単位補償値 Δi_{d0} および Δi_{q0} と電気角の各種の値とを対応付けるテーブルを、補償電流マップ 20a として 30
予めメモリに格納しておく。例えば、図 5 に示すような無負荷誘導起電力波形の実測データに基づき、図 6 に示すように電気角と対応付けられる d 軸電流単位補償値 Δi_{d0} および q 軸電流単位補償値 Δi_{q0} を求め、これらに基づき補償電流マップ 20a を作成する。 40

【0043】

基本補償電流決定部 20 は、上記のようにして作成された補償電流マップ 20a を参照することにより、上記修正電気角 θ_{mre} に対応する q 軸電流単位補償値 Δi_{q0} および d 軸電流単位補償値 Δi_{d0} を求める。これらの q 軸電流単位補償値 Δi_{q0} および d 軸電 50

流単位補償値 Δi_{d0} は、単位トルク当たりの電流補償値として振幅決定部22に入力される。

【0044】

モータ6の出力トルクを T としたとき、電気リップルの発生を抑制するためにモータ6に流すべき q 軸電流補償値 Δi_q および d 軸電流補償値 Δi_d は、それぞれ、上記の q 軸電流単位補償値 Δi_{q0} および d 軸電流単位補償値 Δi_{d0} の T 倍の値となる。したがって、 q 軸電流補償値 Δi_q および d 軸電流補償値 Δi_d を得るには、モータ負荷に相当する物理量に応じた係数を上記の q 軸電流単位補償値 Δi_{q0} および d 軸電流単位補償値 Δi_{d0} に乘算すればよい。例えば、モータ6の出力トルクに対応する値である q 軸電流の検出値 i_q または q 軸基本電流指令値 i^*_{q0} に応じた係数を q 軸電流単位補償値 Δi_{q0} および d 軸電流単位補償値 Δi_{d0} に乘算することにより、モータ負荷に比例する値として q 軸電流補償値 Δi_q および d 軸電流補償値 Δi_d を算出すればよい。本実施形態における振幅決定部22は、それに入力される q 軸基本電流指令値 i^*_{q0} に相当するモータトルク値を求め、求めたトルク値を q 軸電流単位補償値 Δi_{q0} および d 軸電流単位補償値 Δi_{d0} に乘算することにより、 q 軸電流基本補償値 Δi_{q1} および d 軸電流基本補償値 Δi_{d1} を求める。このようにして求められた q 軸電流基本補償値 Δi_{q1} および d 軸電流基本補償値 Δi_{d1} は、乗算器26および28にそれぞれ入力される。

【0045】

一方、修正率算出部24は、電流制御系のゲインとしてゲイン・位相決定部16から出力されるゲイン G の逆数 $1/G$ を修正率 R_m として算出する。この修正率 R_m は、乗算器26および28に入力される。そして、乗算器26は、修正率 R_m を上記の q 軸電流基本補償値 Δi_{q1} に乘算することにより q 軸電流補償値 Δi_q を求め、乗算器28は、修正率 R_m を上記の d 軸電流基本補償値 Δi_{d1} に乘算することにより d 軸電流補償値 Δi_d を求める。このような修正率 R_m の乗算により、電流制御系の周波数特性によるゲイン低下が補償されることになる。

【0046】

上記のようにして得られた q 軸電流補償値 Δi_q および d 軸電流補償値 Δi_d は、トルクリップル補償部118から出力され、既述のように、 q 軸電流補償値 Δi_q は q 軸基本電流指令値 i^*_{q0} に、 d 軸電流補償値 Δi_d は d 軸基本電流指令値 i^*_{d0} にそれぞれ加算される(式(4a)(4b)参照)。そして、これにより得られる q 軸電流指令値 i^*_q および d 軸電流指令値 i^*_d は、電流制御部200を含む電流制御系に目標値として与えられる。

【0047】

図8および図9は、上記のような電気リップル抑制のための補償電流の効果の一例を示す波形図である。図8では、モータ6の出力トルク(目標値)が1[Nm]の場合において、波形Cで示される q 軸電流補償値および波形Dで示される d 軸電流補償値が使用されることにより、モータ6の実際の出力トルクが、波形Aで示されるようなトルク(補償なし)から波形Bで示されるようなトルク(補償あり)となり、トルクリップルが抑制されることが示されている。また、図9では、モータ6の出力トルク(目標値)が3[Nm]の場合において、この出力トルクすなわちモータ負荷に応じて波形Cで示されるような q 軸電流補償値および波形Dで示されるような d 軸電流補償値が使用されることにより、モータ6の実際の出力トルクが、波形Aで示されるトルク(補償なし)が波形Bで示されるトルク(補償あり)となり、トルクリップルが抑制されることが示されている。

【0048】

<6 効果>

一般に、電動パワーステアリング装置で使用されるモータにおいては、負荷変動に加えて、運転状況に応じて回転速度も刻々変化する。このため、既述の従来技術のように電気リップル抑制のための補償電流の振幅をモータ負荷に比例して変化させるだけでは、種々の運転状況において電気リップルを十分に低減することはできない。すなわち、モータ6についての電流制御系が周波数特性を有することから、モータ6の回転速度が変化すると、

20

40

50

実際の補償電流はその振幅や位相が変化し設定通りにはならない。また、この周波数特性によりモータ6における実際の補償電流と誘起電圧との間に位相ずれが生じている場合には、モータ負荷に応じて補償電流の振幅が大きくなると、誘起電圧と補償電流との相互作用の結果である電気リップルの位相が変化する。このため、電気リップルを十分に低減するには、モータ負荷に応じて補償電流の位相を調整することも必要となる。

【0049】

これに対し、上記実施形態では、電気リップル抑制のための補償電流の指令値の設定において、モータ負荷に相当する物理量であるq軸基本電流指令値 i^*_{q0} に比例したq軸電流基本補償値 Δi_{q1} およびd軸電流基本補償値 Δi_{d1} が算出されるだけでなく、電流制御系の周波数特性によるゲイン低下が補われるように、ゲイン・位相決定部16および修正率算出部24によって得られた修正率 R_m がq軸電流基本補償値 Δi_{q1} およびd軸電流基本補償値 Δi_{d1} に乘算される。そして、この乗算結果であるq軸電流補償値 Δi_q およびd軸電流補償値 Δi_d が電気リップル抑制のための補償電流の指令値として使用される。したがって、運転状況に応じてモータ6の回転速度が変化すると、q軸電流補償値 Δi_q およびd軸電流補償値 Δi_d によって示される指令値としての補償電流の振幅が回転速度の変化に応じて修正される。さらに上記実施形態では、電流制御系の周波数特性による位相遅れが補われるように、ゲイン・位相決定部16によって求められた位相差 $\Delta\theta_e$ （負値）に応じて電気角 θ_{re} が修正される。そして、その結果得られる修正電気角 θ_{mre} に対応するq軸電流単位補償値 Δi_{q0} およびd軸電流単位補償値 Δi_{d0} が補償電流マップ20aから求められ、これらに基づき、上記のq軸電流補償値 Δi_q およびd軸電流補償値 Δi_d が決定される。

【0050】

このように上記本実施形態では、電気リップル抑制のためにモータ6に流すべき補償電流の振幅がモータ負荷の変動に応じて変化するだけでなく、モータ6の回転速度に応じて（したがって補償電流の周波数に応じて）電流制御系の周波数特性の影響を相殺すべく、指令値としての補償電流の振幅および位相が修正される。また、この修正によってモータ6における実際の補償電流と誘起電圧との間の位相ずれが解消されるので、モータ負荷に応じた補償電流の位相調整は不要となる。したがって、モータ負荷の変動に加え、運転状況に応じてモータ6の回転速度が刻々変化しても、適切な補償電流がモータ6に与えられ、これにより、電気リップルの発生を十分に抑制することができる。

【0051】

<7 変形例>

上記実施形態では、電動パワーステアリング装置の駆動源として3相ブラシレスモータ6が使用されているが、3相以外の相数のブラシレスモータを使用した場合においても、上記と同様の構成により同様の効果が得られる。

【0052】

また、ブラシレスモータに代えてブラシ付きの直流モータを使用した場合であっても、トルクリップルを補償するための補償電流の設定に際し、その電流制御系の周波数特性によるゲイン低下や位相遅れが補われるように補償電流の振幅や位相を修正する構成とすることにより、上記と同様の効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施形態に係る電動パワーステアリング装置の構成をそれに関連する車両構成と共に示す概略図である。

【図2】3相ブラシレスモータにおける3相交流座標とd-q座標とを説明するための模式図である。

【図3】上記実施形態に係る電動パワーステアリング装置における制御装置であるECUの構成を示すブロック図である。

【図4】上記実施形態におけるトルクリップル補償部の機能的構成を示すブロック図である。

【図5】上記実施形態におけるブラシレスモータの無負荷誘導起電力（誘起電圧）を示す

電圧波形図である。

【図6】上記実施形態においてトルクリップル補償のためにモータに流すべき補償電流を示す電流波形図である。

【図7】上記実施形態における電流制御系の周波数特性を示すボード線図である。

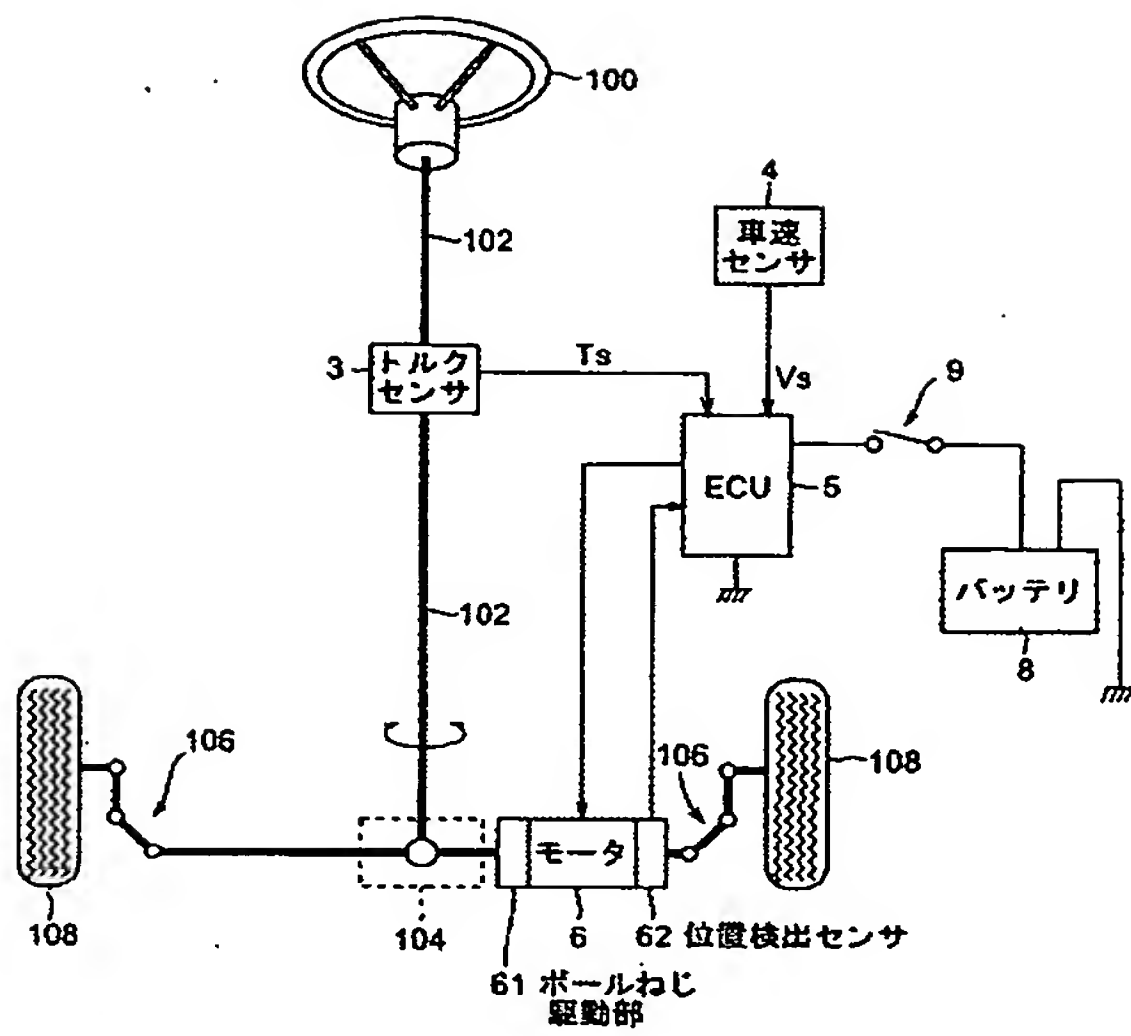
【図8】上記実施形態におけるトルクリップル補償の効果を示す波形図である。

【図9】上記実施形態におけるトルクリップル補償の効果を示す波形図である。

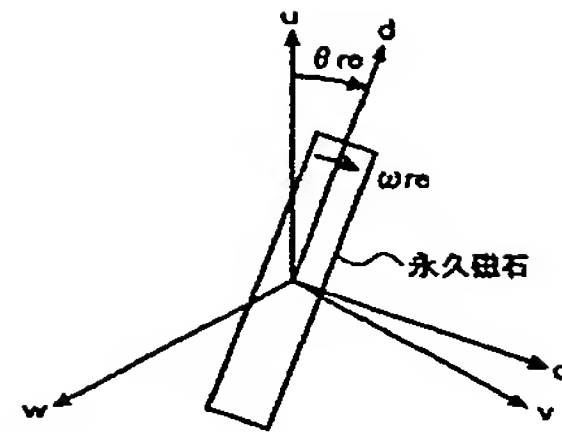
【符号の説明】

5	…電子制御ユニット (ECU)	
6	…ブラシレスモータ	
10	…マイクロコンピュータ (モータ制御部)	10
12	…微分器	
14	…周波数算出部	
16	…ゲイン・位相決定部	
16a	…周波数特性マップ	
18	…減算器 (位相修正手段)	
20	…基本補償電流決定部	
20a	…補償電流マップ	
22	…振幅決定部 (振幅決定手段)	
24	…修正率算出部 (振幅修正手段)	
26, 28	…乗算器 (振幅修正手段)	20
62	…位置検出センサ	
114	…目標電流演算部	
118	…トルクリップル補償部 (補償電流決定手段)	
121, 122	…加算器 (補正手段)	
123, 124	…減算器	
126	…d軸電流PI制御部	
128	…q軸電流PI制御部	
150	…3相PWM変調部	
152	…モータ駆動回路	
162	…ロータ角度位置検出器	30
200	…電流制御部 (制御手段)	
Ts	…操舵トルク信号	
i^*_{d0}	…d軸基本電流指令値 (目標値)	
i^*_{q0}	…q軸基本電流指令値 (目標値、負荷相当量)	
Δi_d	…d軸電流補償値 (補償電流指令値)	
Δi_q	…q軸電流補償値 (補償電流指令値)	
i^*_d	…d軸電流指令値 (補正後の目標値)	
i^*_q	…q軸電流指令値 (補正後の目標値)	
i_d	…d軸電流検出値	
i_q	…q軸電流検出値	40
e_d	…d軸電流偏差	
e_q	…q軸電流偏差	
θ_{re}	…電気角	
ω_{re}	…ロータ角速度 (電気角換算の回転角速度)	
$\Delta \theta_e$	…電流制御系の位相差	
G	…電流制御系のゲイン	
θ_{mre}	…修正電気角	
Rm	…修正率	

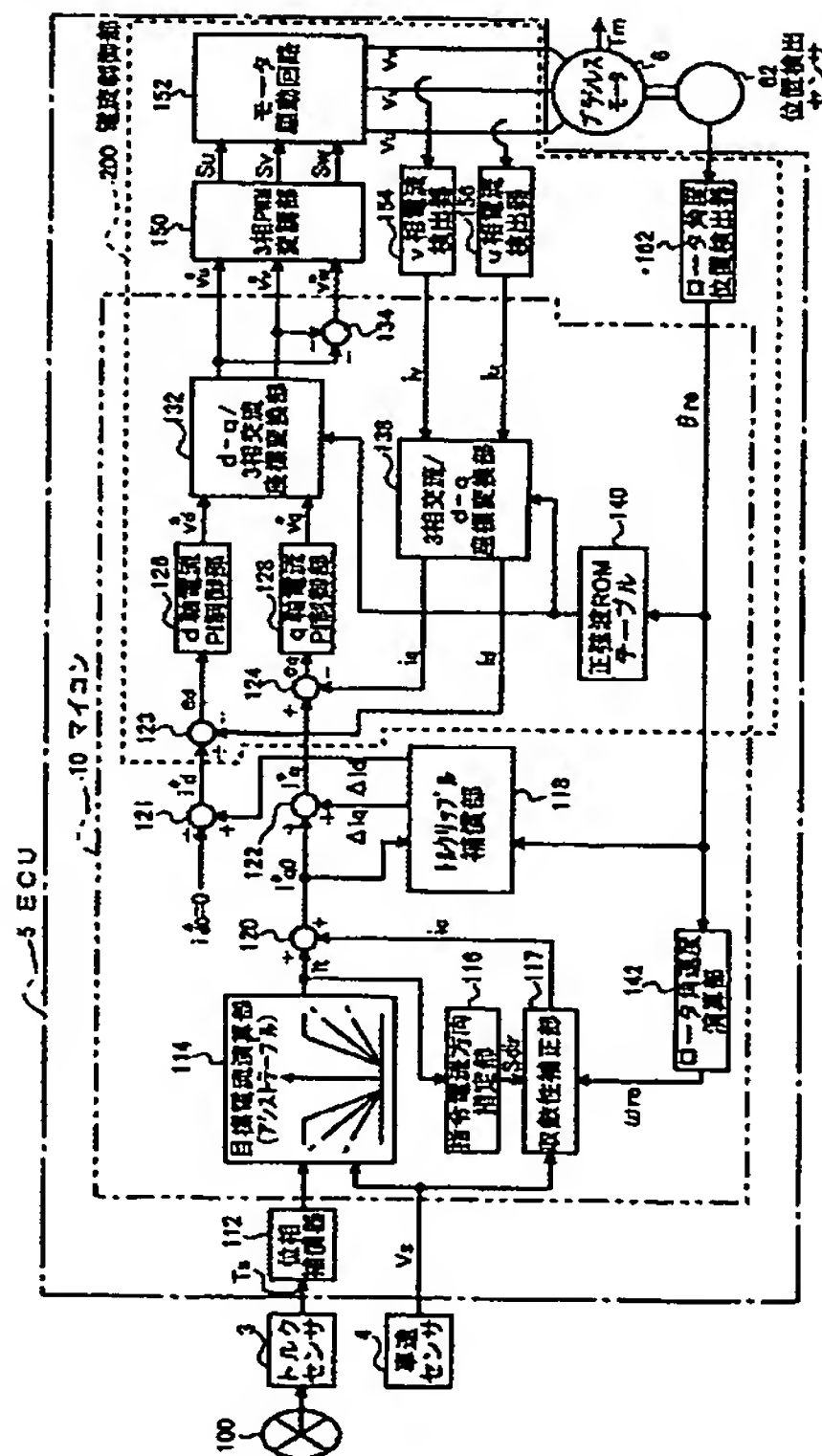
【図 1】



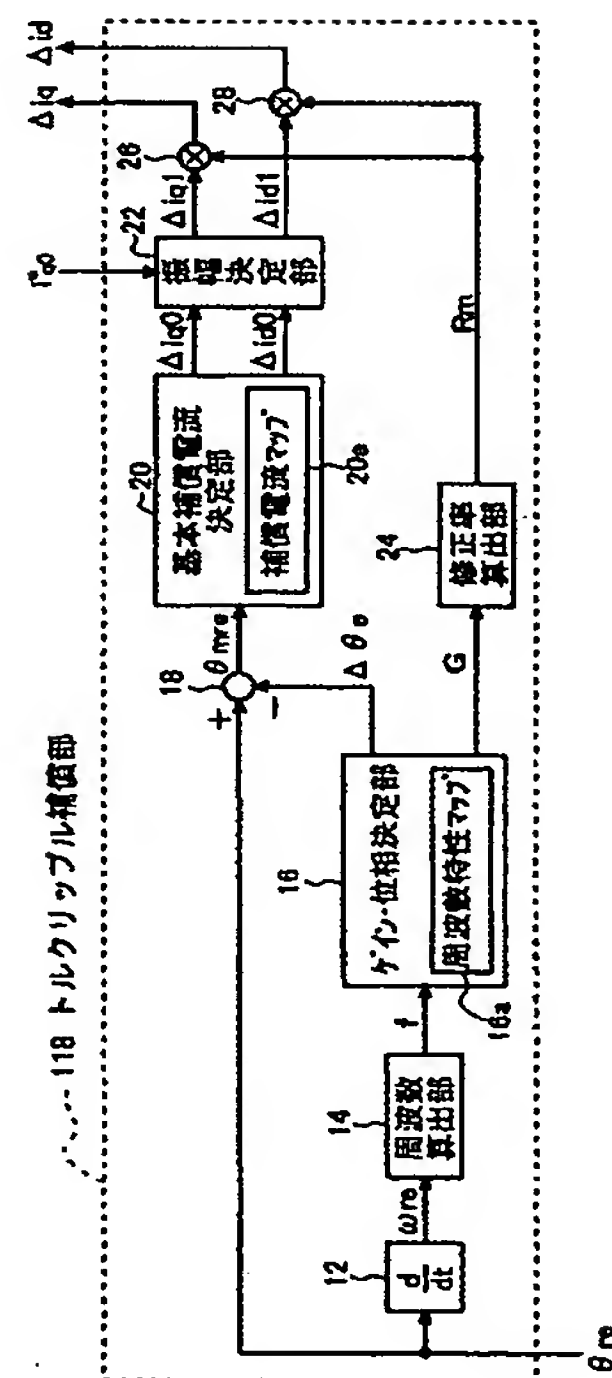
【図 2】



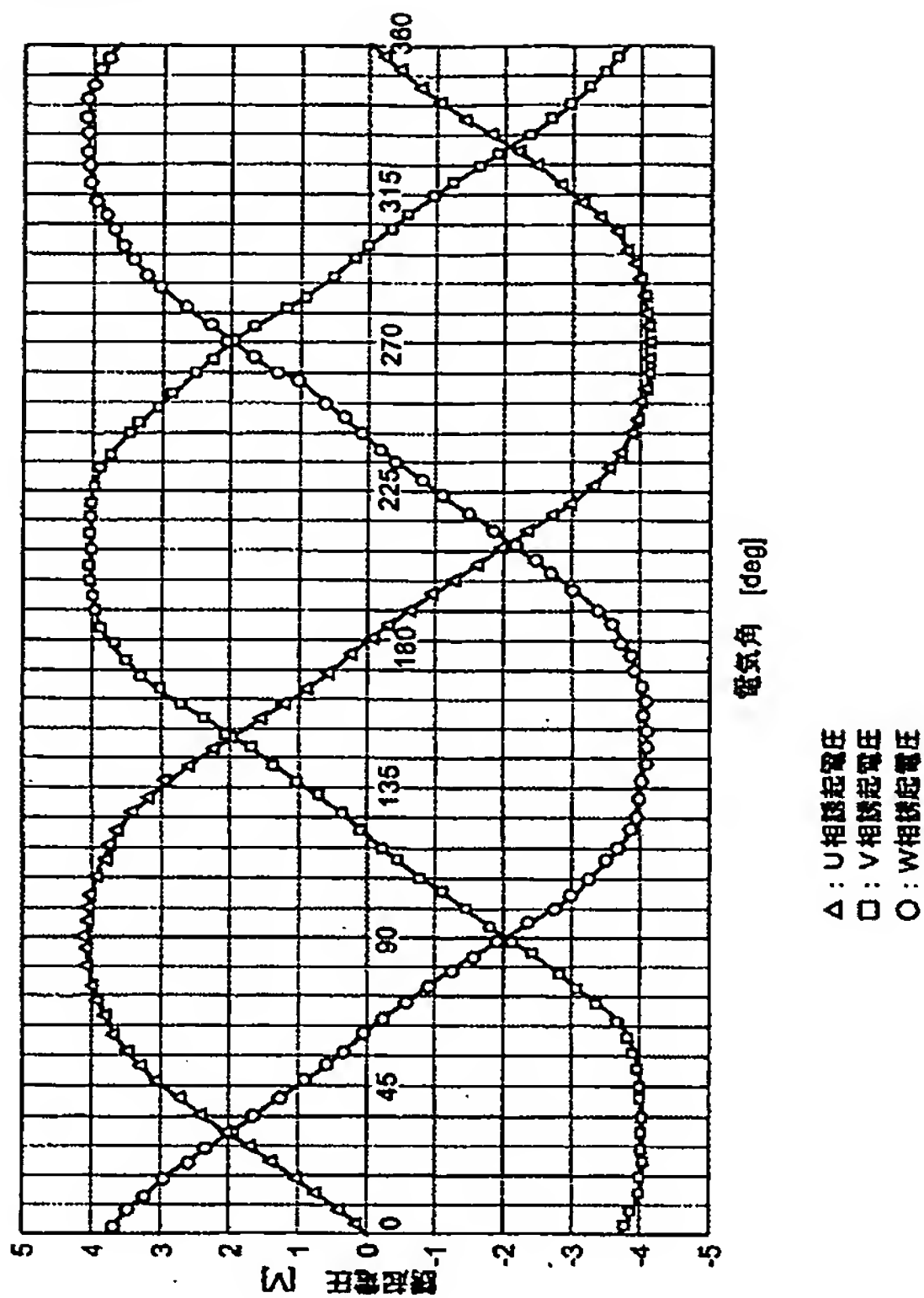
【図 3】



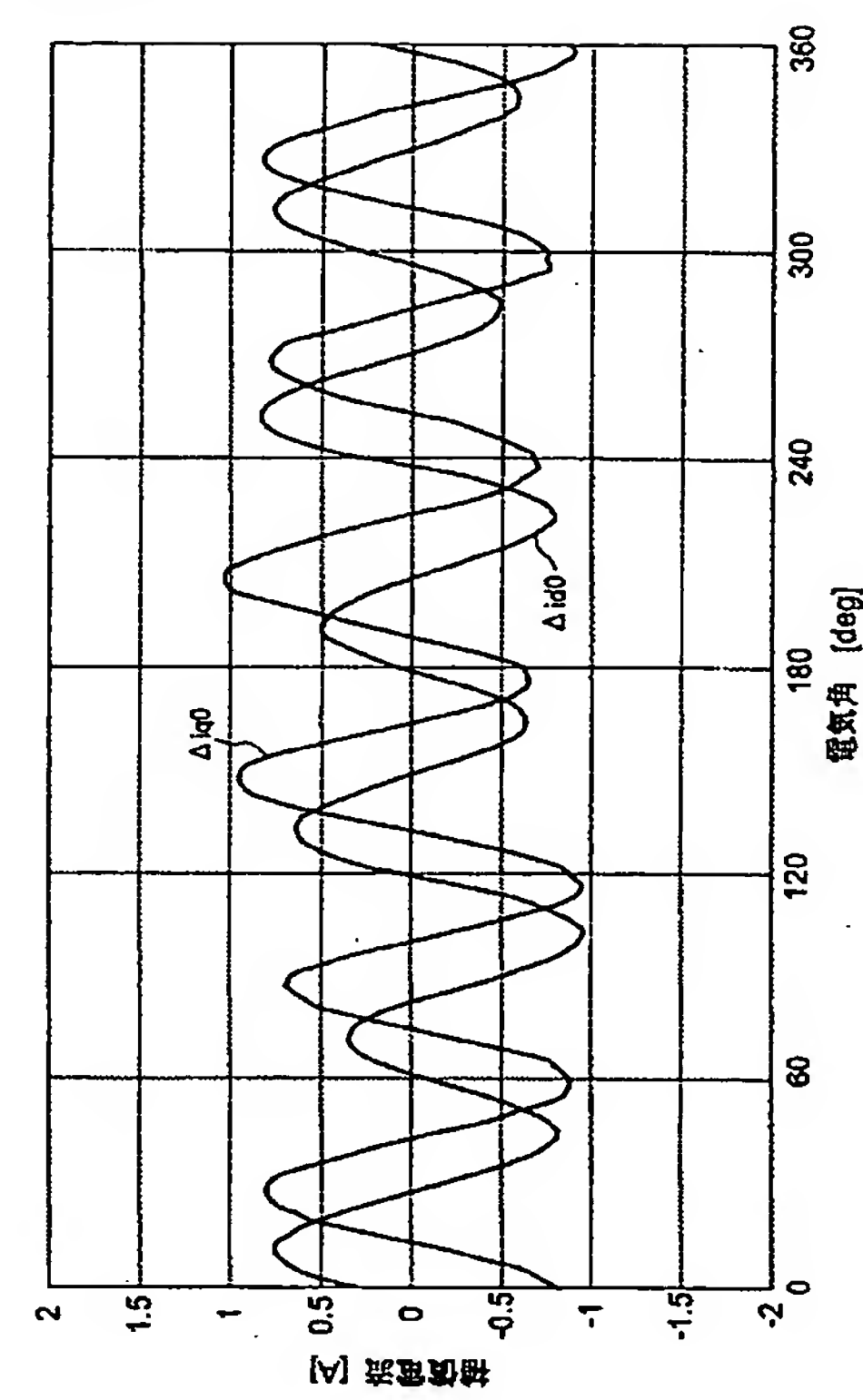
【図 4】



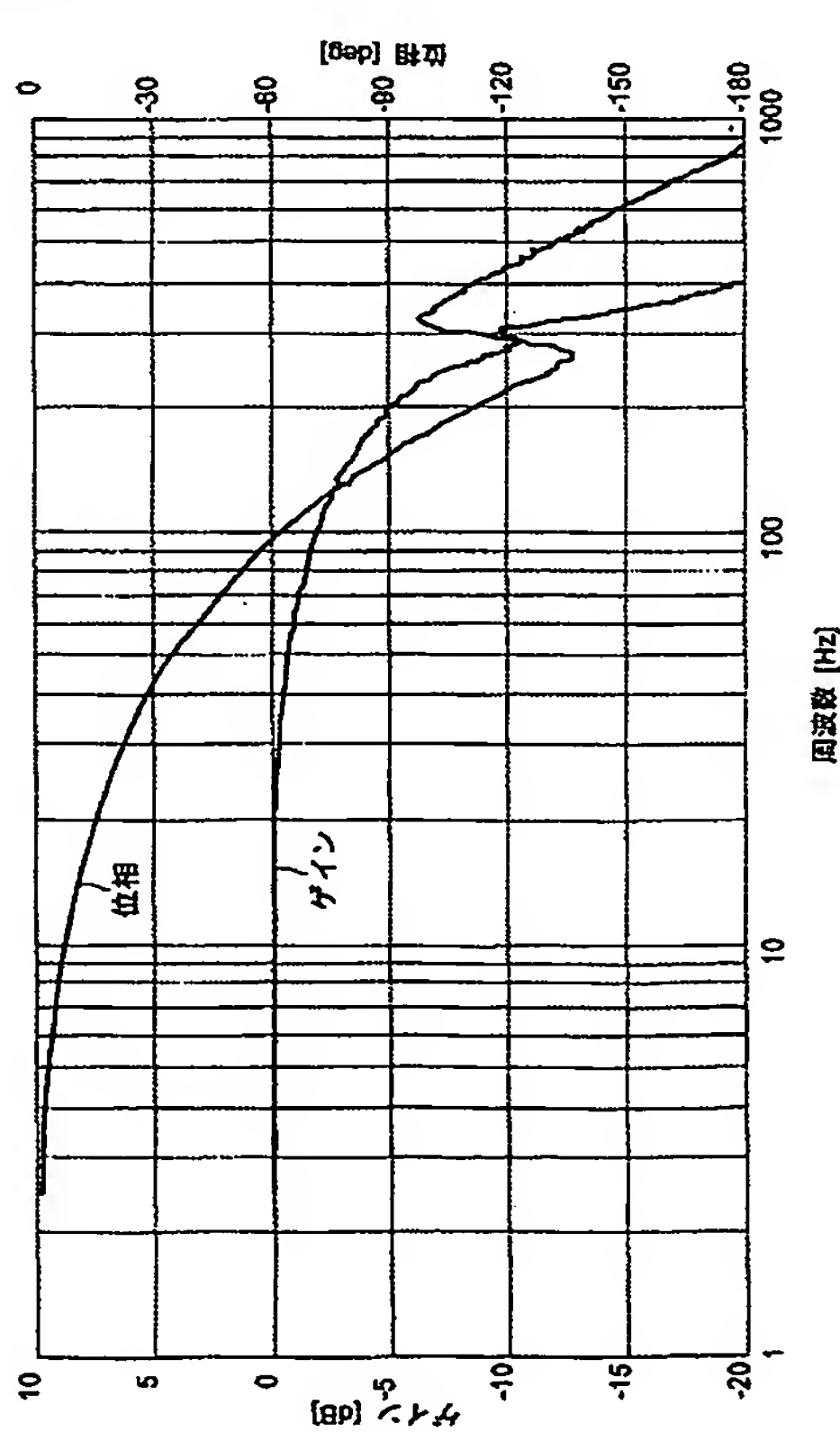
【図 5】



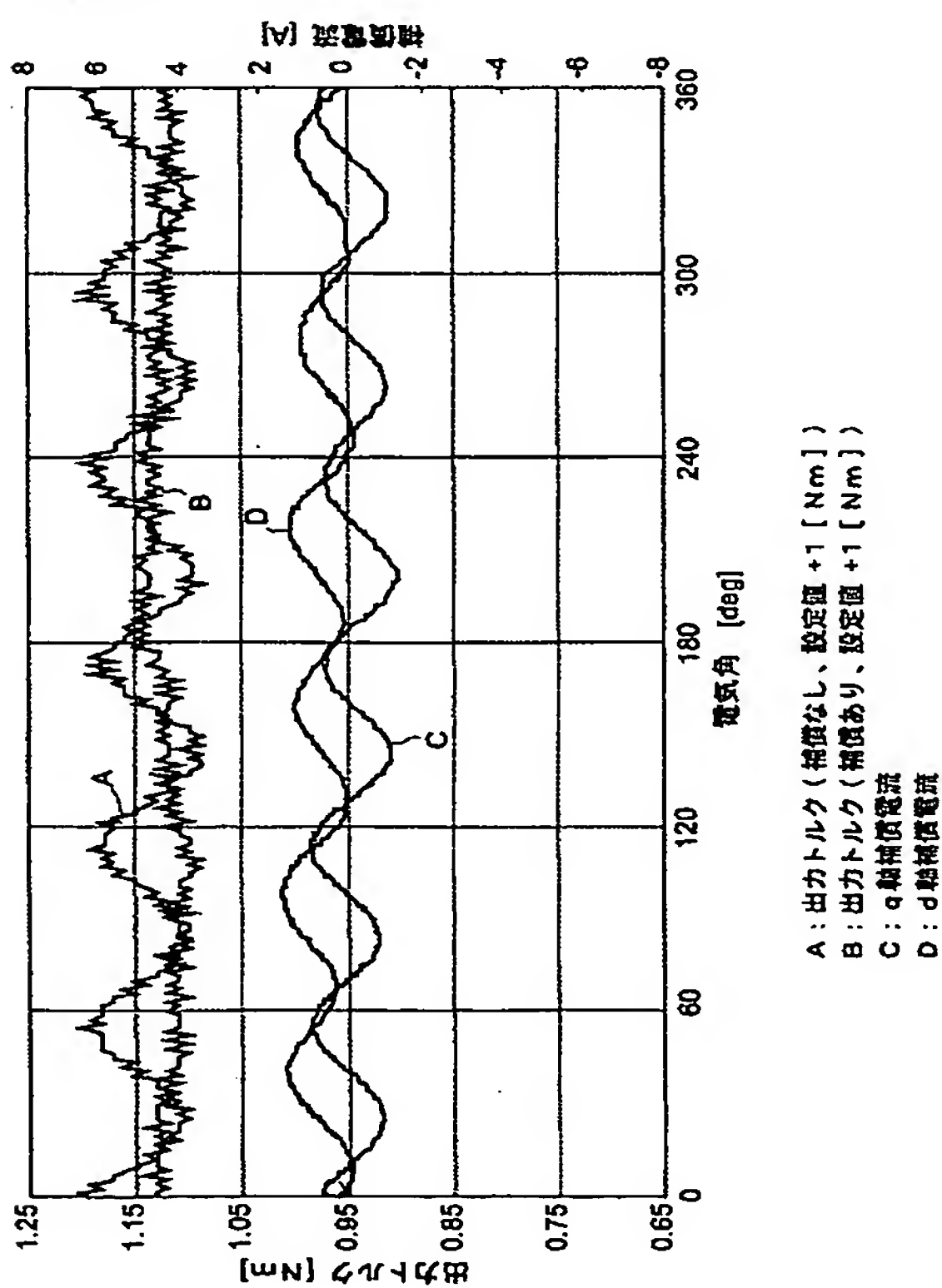
【図 6】



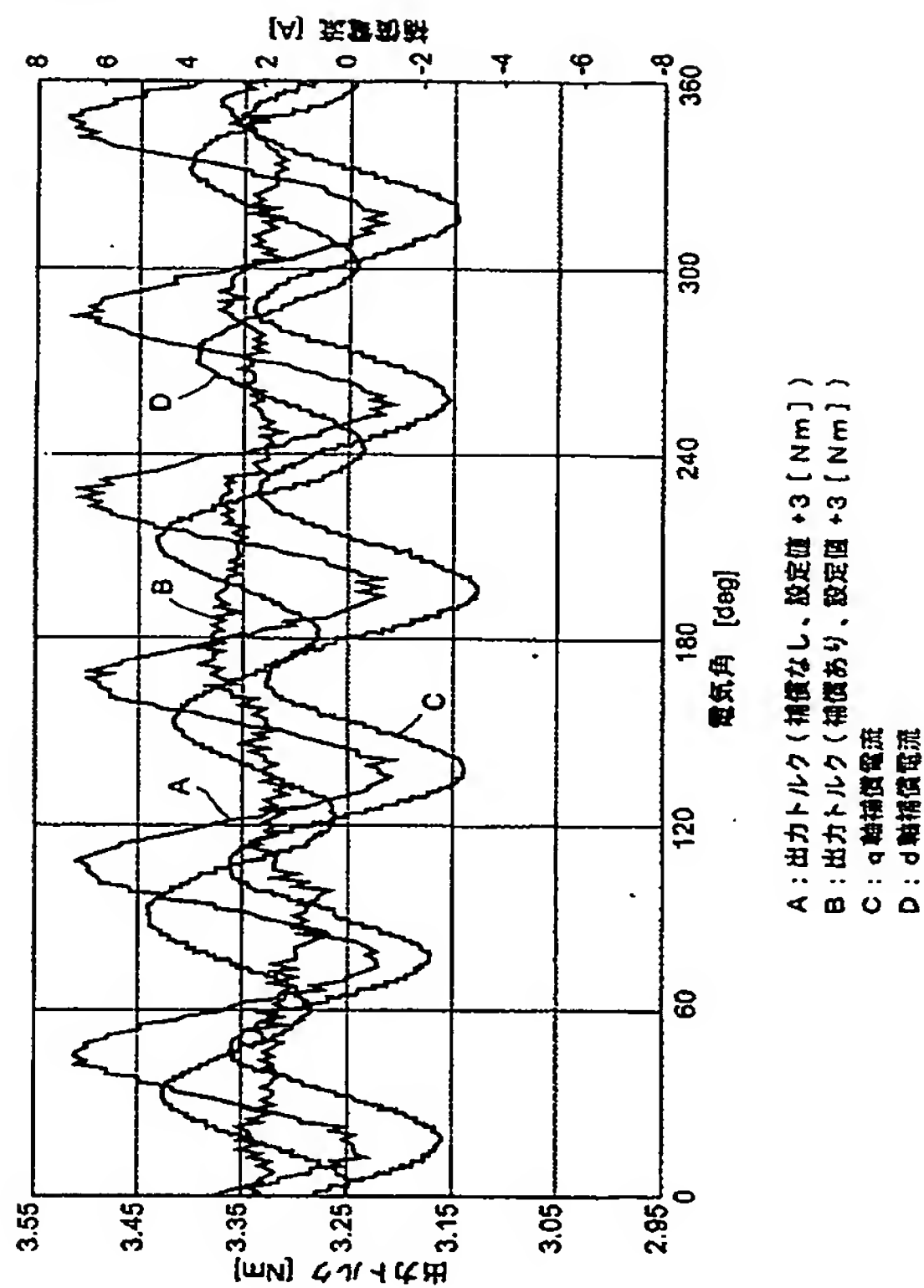
【図 7】



【図 8】



【図9】



フロントページの続き

Fターム(参考) 5H576 AA15 BB04 BB05 CC02 DD02 DD07 EE01 EE14 EE19 GG02
GG04 HB02 JJ03 JJ17 KK06 LL01 LL22 LL39 LL41